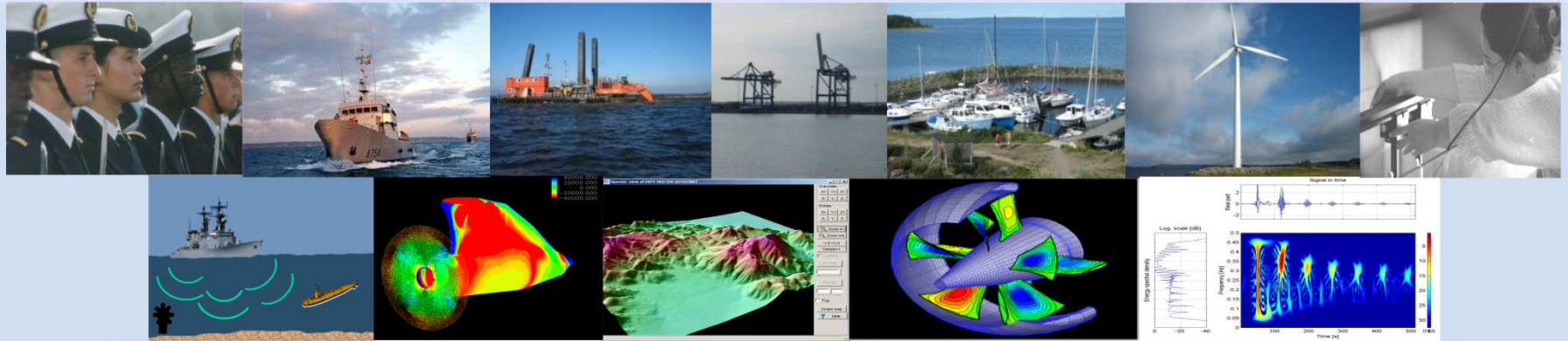




Institut de Recherche de l'École navale EA 3634



Groupe M2EN Mécanique et Énergie en Environnement Naval

frederic.hauville@ecole-navale.fr

Journée d'étude : Les enjeux scientifiques autour des EMR

12 novembre 2014



Personnel E.C. et Moyens spécifiques

10 E.C. permanents : 1 PU, 8 MCF (2 HdR) (section 60, 63)

1 E.C. contractuels (section 63) + **2 PRAGs**

15 doctorants : 6 AERs, 1 BMO, 1 Région Bzh, 4 CIFREs, ENSAM, IFREMER, PRAG

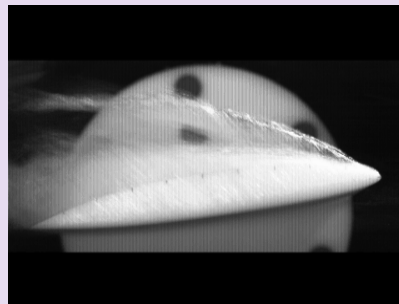
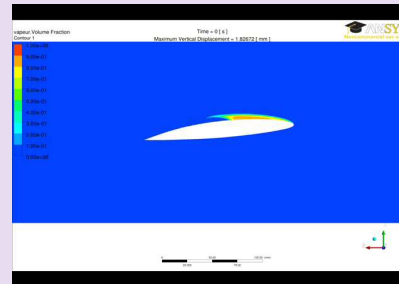
- ~ **20 ingénieurs, techniciens, administratifs** → **SEFER, SAGA, CR2I, CIREN**
- **Tunnel** hydrodynamique de cavitation ($2 < V < 15$ m/s ; $0,1 < P < 3$ bar ; $0,18 \times 0,18 \times 1$ m³)
- Écoulement **Taylor-Couette diphasique** ($D=440$ mm , $e=20$ mm → $\eta=0,91$, $\delta=0,1$; $h=886$ mm → $\Gamma=44,3$)
- Banc expérimental de **machines électriques polyphasées**
- **Plate-formes expérimentales académiques** d'éoliennes
 - **RIM – DRIVEN** ($D_{hélice} = 0,8$ m)
 - **SHIVA** ($D_{max} = 1,6$ m, $L = 1$ m, en construction)
- **Voilier instrumenté**
 - **Projet VoilENav** : système d'instrumentation embarqué sur un voilier J/80
- **Moyens de calcul** :
 - ✓ Stations, calculateur **CapArmor** (Ifremer)
 - ✓ Codes CFD : Ansys-CFX®, ICEM, suite Ansys (CFX, Fluent, Mechanical, Ansoft), Fine/Marine, OpenFoam, codes singularités

Positionnement scientifique

Expertise multidisciplinaire : Mécanique, Mécanique des fluides, Électrotechnique, mathématiques Appliquées

Capacité d'approche globale des systèmes en environnement marin

Modélisation



Expérimentation

Comprendre la physique de phénomènes en interaction par le biais d'études **expérimentales**, de méthodes d'**analyse** et de **simulation**.

Transfert technologique et conception des systèmes



Contexte

Recherche appliquée pluridisciplinaire orientée vers :
l'hydrodynamique et la conversion d'énergie

Domaines d'Applications :
Ingénierie Navale et Énergies Marines Renouvelables

Intégration dans les axes scientifiques de la Région Bretagne, du Pole Mer, de FEM ...

Collaborations locales : LBMS, UBO, ENSTA-Bzh, IFREMER
Intégration dans les réseaux nationaux (laboratoires des Arts et Métiers)

Ouverture internationale : Collaboration recherche → US, CN, UK, NZ, CA

Formation par la recherche : Master recherche EN/Arts et Métiers, Mastère spécialisé EMR

Axes de recherche

Axe 1 – Hydrodynamique

Coordinateur MCF HdR J. A. Astolfi

- Thème 1 : Écoulements complexes en hydrodynamique navale
- Thème 2 : Interaction fluide structure

Axe 2 - Conversion d'Énergie

Coordinateur MCF HdR J.- F. Charpentier

- Thème 1 : Systèmes électromécaniques non conventionnels pour la propulsion et les Energies Marines Renouvelables
- Thème 2 : Modélisation globale des chaînes d'énergie maritime (naval EMR)

Axe 1 – Hydrodynamique

- Thème 1 : Écoulements complexes en hydrodynamique navale
- Thème 2 : Interaction Fluide Structure

Domaines d'applications

Écoulements complexes : grand nombre de Reynolds, turbulence, cavitation, instabilités, couplage fluide structure

Écoulements sur les surfaces portantes : pales hélices marines et d'hydroliennes, safrans, stabilisateurs .. voiles..

Enjeux scientifiques

La physique associée et la modélisation ne sont pas complètement maîtrisées

Méthodes développées

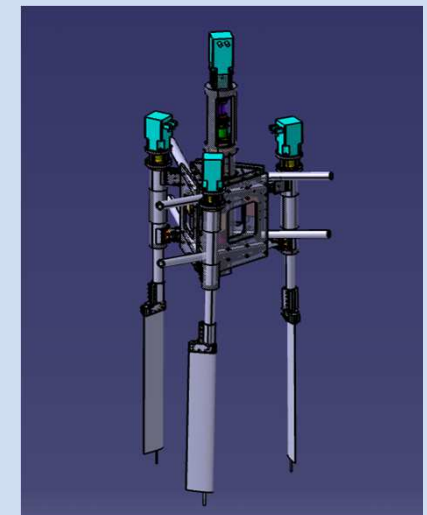
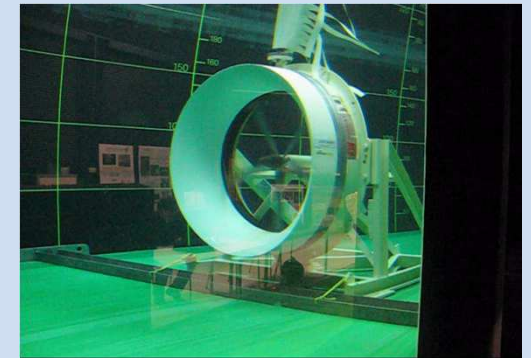
- ❖ Mise au point d'expériences académiques et de techniques expérimentales avancées
 - ✓ Efforts hydrodynamiques
 - ✓ Champs de vitesse par LDV/PIV,
 - ✓ Champs de pression pariétale par réseau de capteurs
 - ✓ Analyse du comportement hydroélastique des structures
 - ✓ Visualisation par caméra à très haute fréquence



Axe 2 – Conversion d'Énergie

- Thème 1 : Systèmes électromécaniques non conventionnels pour la propulsion et les EMR.
- Thème 2 : Modélisation globale des chaînes d'énergie maritime (naval EMR)

- **Analyse et modélisation de ces systèmes dans leur environnement**
- **Proposition de méthodologies de conception de ces systèmes**
- **Approche globale avec une forte composante pluridisciplinaire**
- **Axe de recherche fédérateur au niveau du groupe M2EN**



Axe 2 / Thème 1

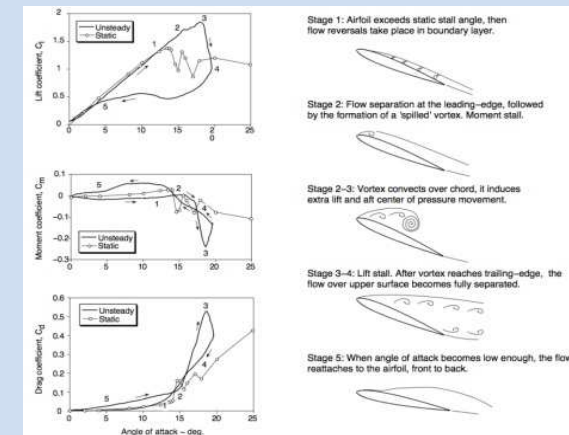
SHIVA : Système Hydrodynamique Intelligent à Variation d'Angle (Smart Hydro power Installation with Variable Angle)

Développer une plateforme **académique** expérimentale pour étudier le concept de turbine à axe transverse avec **variation cyclique de l'angle de pas** ($\beta(\theta)$ avec $\theta = \omega t$)

- Validation de modèles numériques
- Mesurer les performances des turbines (propulseur ou hydrolienne)
- Réaliser des **études paramétriques**
- Tester de nouvelles cinématiques pour améliorer la performance des turbines VAWT
 - ✓ en retardant le **décrochage** ($\beta(t)$)
 - ✓ en contrôlant le **décrochage dynamique** ($\beta(\dot{t})$)

Méthodes mises en œuvre

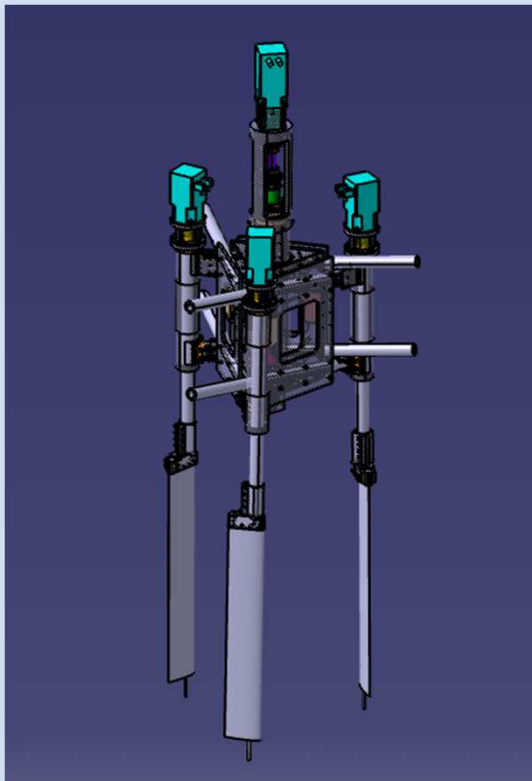
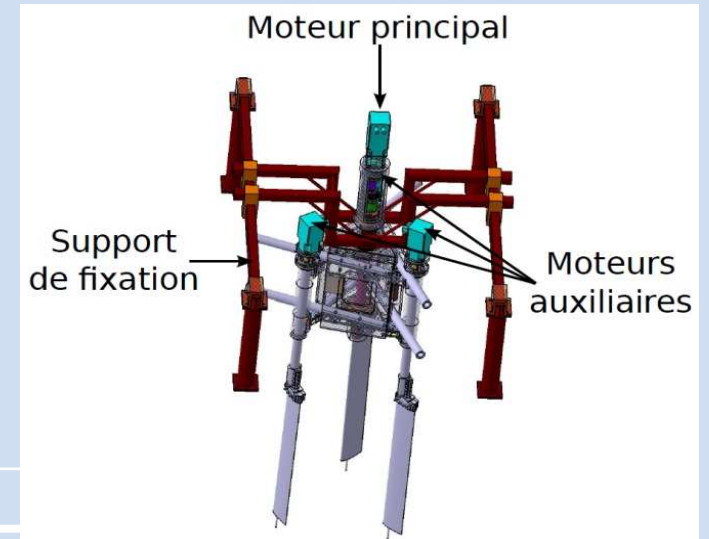
- Modélisation par théorie simplifiée des tubes de courant (**DMST**)
 - ✓ Prise en compte du **décrochage dynamique** (Gormont ; ONERA EDLIN)
- Modélisation **2D** par méthode **RANSE** (AnsysCFX) → maillage glissant et déformant
 - ✓ Ecoulement fortement instationnaire décollé
 - ✓ Tests en tunnel sur profil porteur 2D oscillant : PIV, LDV...
- **Darrieus** → **SHIVA** : tests de différentes lois de pas
 - ✓ Azimut décrit par 6 lois (zone) assemblées qui forment une loi unique continue dérivable



Axe 2 / Thème 1

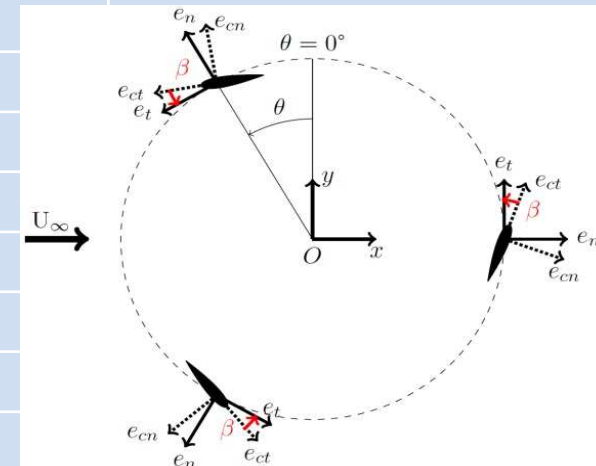
SHIVA : Système Hydrodynamique Intelligent à Variation d'Angle (Smart Hydro power Installation with Variable Angle)

- Turbine ou propulseur à axe transverse à pas variable
- Contrôle de la loi de pas cyclique ($\beta(\theta)$ avec $\theta = \omega t$)
moteurs auxiliaires synchronisés au moteur de rotation principal
→ tester toute les cinématiques



Hydrolienne SHIVA

Diamètre du rotor ($D = 2 R$)	$0,8 < D < 1,6 \text{ m}$
Nombre de pales (M)	3
Type de profil	NACA 0018
Envergure des pales (l)	1 m
Corde des profils (c)	0,15 m
Position de l'axe de rotation des profils	$\frac{1}{4}$ corde
Ω_{max} (moteur principal et auxiliaires)	150 tr/min
Couple max moteur principal	100 N.m
Couple max moteurs auxiliaires	40 N.m
Solidité ($\sigma = N c / R$)	$0,5625 < \sigma < 1,125$
Allongement ($AR = l / c$)	6,7
Rapport corde sur rayon ($CR = c / R$)	$0,1875 < CR < 0,375$



Axe 2 / Thème 1

SHIVA : Système Hydrodynamique Intelligent à Variation d'Angle (Smart Hydro power Installation with Variable Angle)

Comparaison Darrieus / SHIVA $\lambda=3$ ($D = 1,6 \text{ m}$; $V = 2 \text{ m/s}$; $\omega_{rotor} = 72 \text{ tr/min}$)

→ stratégie : retarder l'angle de décrochage dans la partie amont

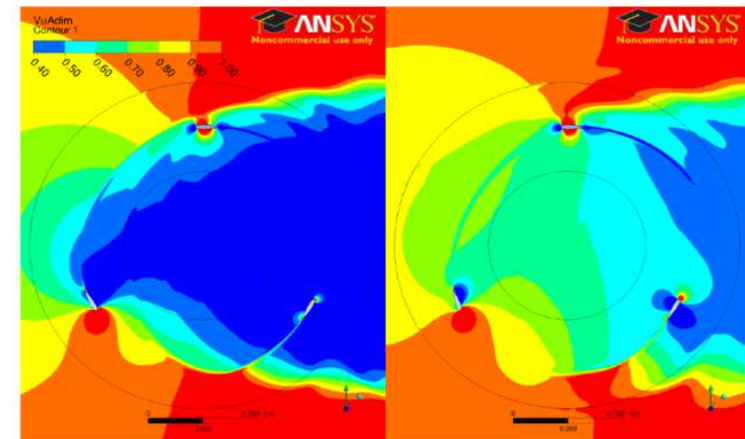
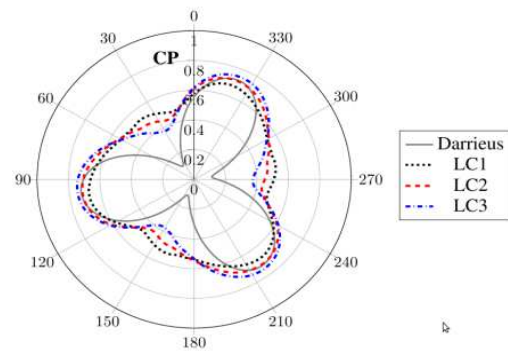
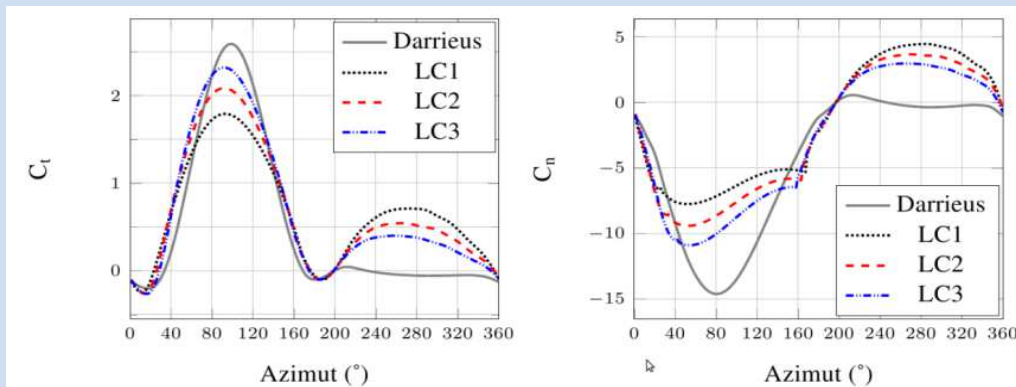
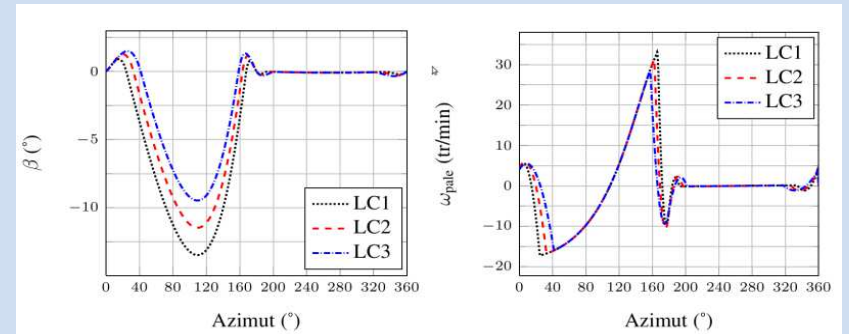
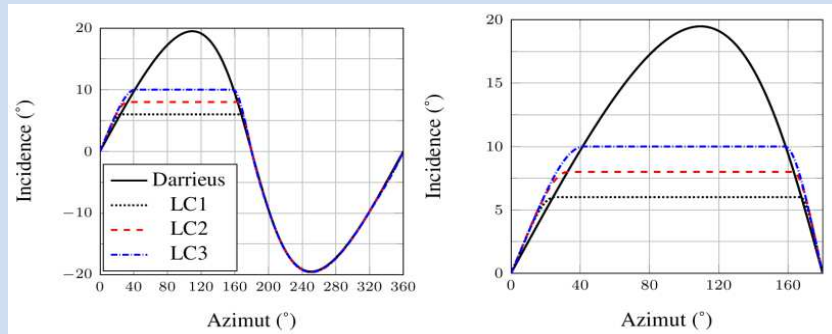


FIGURE 4.34 – Iso-contours du rapport de vitesse axiale (U_x/U_∞) au cœur de la turbine pour la configuration Darrieus (gauche) et la loi LC2 (droite)

$$C_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho c l V^2}$$

$$CP = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho D l V^3}$$

Axe 2 / Thème 1

SHIVA : Système Hydrodynamique Intelligent à Variation d'Angle (Smart Hydro power Installation with Variable Angle)

Réalisation en cours d'une **maquette expérimentale (2014-2015)**

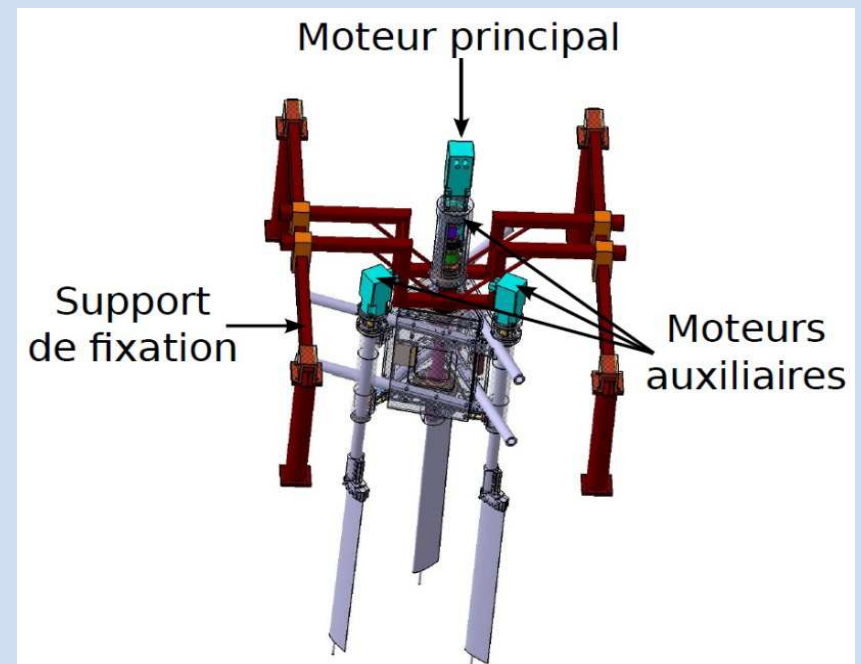
- Moteurs auxiliaires synchronisés au moteur de rotation principal → toutes cinématiques
- Mesure du couple global
- Accès aux grandeurs électriques au niveau des variateurs de vitesse des servos-moteurs
- Mesure des efforts sur une pale (balance hydrodynamique embarquée)
- 1 pale instrumentée (capteurs de pression)
- Jauges de contraintes...

Test de la maquette en bassin de circulation (Ifremer Boulogne 2016 ?)

- Tester plusieurs cinématiques pour plusieurs λ
- LDV, PIV...
- Etude paramétrique...

Prototype SHIVA :

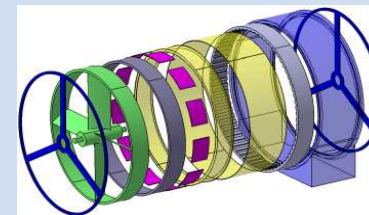
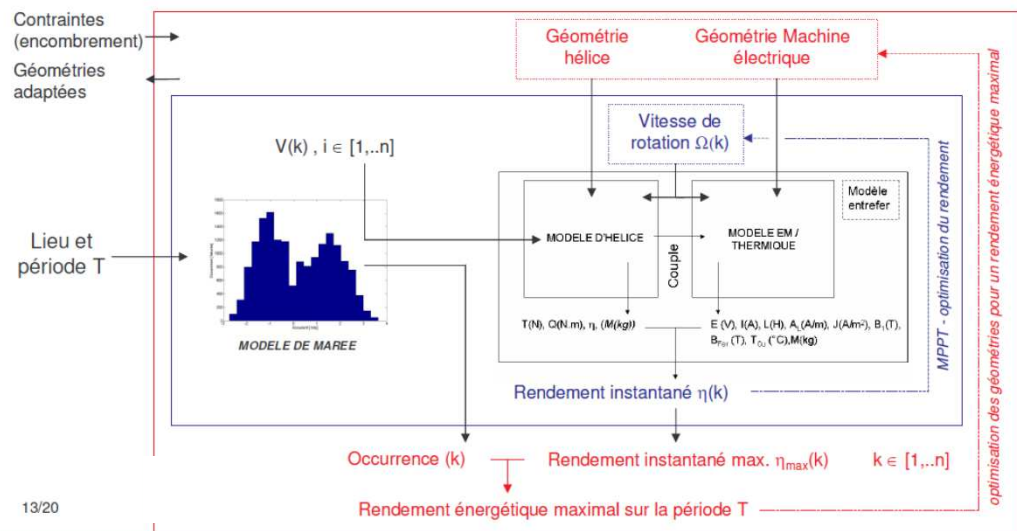
Bourse BMO (7 k€) + autofinancement



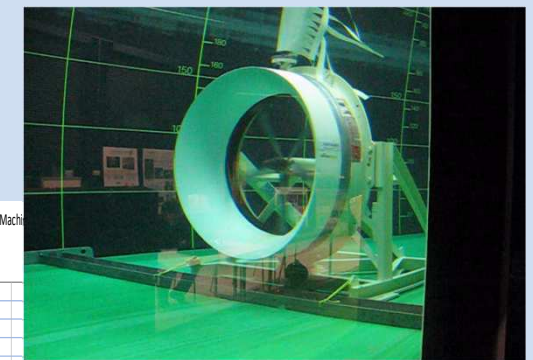
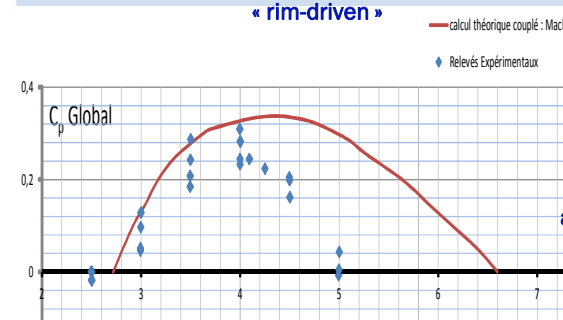
Axe 2 / Thème 1

Conception multidisciplinaire de systèmes machines électriques-hélices

- Propulseurs et turbines hydroliennes en nacelle (POD) ou à entraînement circonférentiel (Rim-Driven)
- Etudes de structures EM non conventionnelles (machines à flux radial, axial et à double saillance)
- Modélisations spécifiques (modèles EM 2D et 3D, modèles thermiques)
- Méthodologie globale de conception optimale par couplage de ces modèles avec des modèles hydrodynamiques
- Validation expérimentale des modèles et de l'approche
- Collaborations académiques : L2EP-AM-Lille / LBMS / IREENA
- Collaborations industrielles : Jeumont / DCNS / ECA-EN



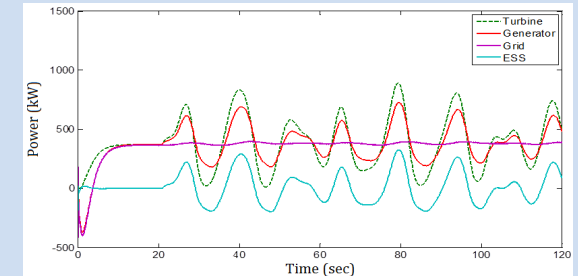
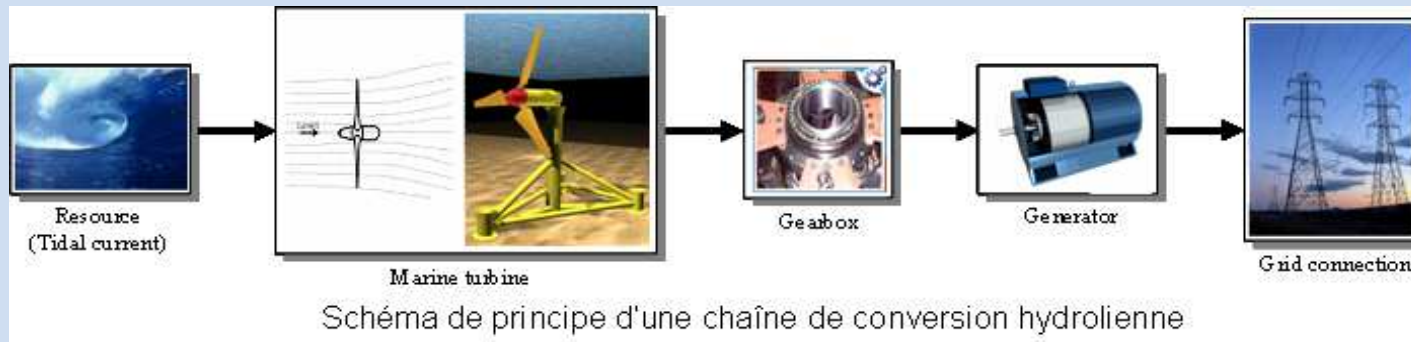
Principe d'un système machine-hélice « rim-driven »



Tests de la Maquette « rim-driven » au bassin d'IFREMER à Boulogne/mer en 2011

« VIRTUAL-HYDROLE »

Elaboration d'outils de simulation de la production électrique d'une chaîne hydrolienne



Simulation du comportement d'une turbine hydrolienne a base de GSAP en présence d'une ressource perturbée par la houle avec et sans SSE (super capacités)

- **Modélisation des différents composants du système : de la ressource au réseau**
- **Couplage de ces modèles pour différentes échelles de temps et de précision au sein d'un environnement modulaire ouvert (Matlab / Simulink)**
- **Transferts de modèles issus des activités du thème 1**
- **Évaluation des choix technologiques et des stratégies de commandes originales en fonction du site choisi et des contraintes**
- **Mise au point d'un SIG-EMR (avec le groupe MOTIM)**
- **Collaboration UBO / LBMS / Univ. Maritime de Shanghai**

- Delafin, P.L.**, 2014, "Analyse de l'écoulement transitionnel sur un hydrofoil. Application aux hydroliennes à axe transverse avec contrôle actif de l'angle de calage", Université Européenne de Bretagne, Université de Bretagne Occidentale, ED n° 156 Ecole doctorale des sciences de la mer, Mention Génie Mécanique, mécanique des fluides et énergétique, 12 septembre 2014, 180 p.
- Maslov, N., Brosset, D., Claramunt, C. and Charpentier, J.-F., 2014, "A Geographical-Based Multi-Criteria Approach for Marine Energy Farm Planning", Special Issue "GIS for Renewable Energy", ISPRS International Journal of Geo-Information, 2014, Vol. 3 Issue2, pp.781-799 ; doi:10.3390/ijgi3020781
- Djebbari, S., Benbouzid, M, Charpentier, J.-F., Scuiller, F., 2014, "A Comparative Study of Modular Axial Flux Podded Generators for Marine Current Turbines", International Review on Modelling and Simulations (IREMOS), vol. 7, Issue 1, pp. 30-34
- Djebbari, S., Charpentier, J.-F., Scuiller, F., Benbouzid, M., 2013, "Génératrice à aimants permanents à grand diamètre avec entrefer immergé : éléments de conception et analyse des performances pour un cahier des charges d'hydrolienne", European Journal of Electrical Engineering (ex RIGE), Vol.16, n° 2/2013, pp.145-176.
- Scuiller, F., 2013, "Magnet Shape Optimization to Reduce Pulsating Torque for a 5-Phase PM Low Speed Machine", Magnetics, IEEE Transactions on , vol.PP, no.99, pp.1,1 ; doi : 10.1109/TMAG.2013.2287855.
- Zhou, Z. ; Scuiller, F. ; Charpentier, J.F. ; Benbouzid, M.E.H. ; Tan, T., 2013, "Power Smoothing Control in a Grid-Connected Marine Current Turbine System for Compensating Swell Effect", Sustainable Energy, IEEE Transactions on , vol.4, no.3, pp. 816-826, July 2013 ; doi : 10.1109/TSTE.2013.2251918.
- Zhou, Z., Benbouzid, M.E.H., Charpentier, J.F., Scuiller, F., Tang, T., 2013, "A Review of Energy Storage Technologies for Marine Current Energy Systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.18 (2013) pp. 390–400.
- Paillard, B., Hauville, F., Astolfi, J.A., 2013, "Simulating Variable Pitch Crossflow Water Turbines : A Coupled Unsteady ONERA-EDLIN Model and Streamtube Model", Renewable Energy, April 2013, Vol. 52, pp. 209-217.
- Benelghali, S., Benbouzid, M., Charpentier, J.-F., 2012, "Generator Systems for Marine Current Turbine Applications : A Comparative Study", IEEE-Journal of Oceanographic Engineering, Vol. 37, Issue 3, pp. 554-563, 2012.
- Mekri, F., Charpentier, J.F., Semail, E., 2012, "An Efficient Control of a Series Connected Two-Synchronous Motor 5-Phase with Non Sinusoidal EMF Supplied by a Single 5-Leg VSI : Experimental and Theoretical Investigations", Electric Power Systems Research, Vol. 92, pp. 11–19, November 2012.
- Ben Elghali, S.E. ; Benbouzid, M.E.H. ; Charpentier, J.F. ; Ahmed-Ali, T. ; Munteanu, I., 2011, "Experimental Validation of a Marine Current Turbine Simulator : Application to a PMSG-Based System Second-Order Sliding Mode Control", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol 58, n° 1 january, 2011, pp. 118-126
- Paillard, B.**, 2011, "Simulation numérique et optimisation d'une turbine hydrolienne à axe transverse à variation cyclique active de l'angle de calage", Université Européenne de Bretagne, Université de Bretagne Occidentale, ED n° 156 Ecole doctorale des sciences de la mer, Mention Génie Mécanique, mécanique des fluides et énergétique, 12 décembre 2011, 283 p.
- Ben Elghali, S.E. , Benbouzid, M.E.H., Ahmed-Ali, T., Charpentier, J.-F., 2010, "High-Order Sliding Mode Control of a Marine Current Turbine Driven Doubly-Fed Induction Generator", IEEE - Journal on Oceanic Engineering, Vol. 35, issue 2, April 2010, pp. 402-411
- S.E. Ben Elghali, M.E.H. Benbouzid, J.F. Charpentier, 2010, "Modeling and Control of a Marine Current Turbine Driven Doubly-Fed Induction Generator", IET-Renewable Power Generation vol 4 issue 1, January 2010 pp 1-11
- Drouen L.**, 2010, "Machines électriques intégrées à des hélices marines Contribution à une modélisation et conception multi-physique", Arts et Métiers ParisTech, École doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur, Spécialité Génie Electrique, 15 décembre 2010, 250 p.